

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Богдан Д. И., Воропай А. В., Воропай Н. И.,
Гнатенко Г. А., Гришакин В. Т., Поваляев С. И.,
Янчевский И. В., Янютин Е. Г.

ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ

Харьков

2010

ББК 30.121
УДК 534.1:539.3

Д. И. Богдан, А. В. Воропай, Н. И. Воропай, Г. А. Гнатенко, В. Т. Гришакин, С. И. Поваляев, И. В. Янчевский, Е. Г. Янютин / **Задачи нестационарного воздействия на элементы конструкций**: Монография. – Харьков: ХНАДУ, 2010. – 237 с. – На русском языке.

Исследовано импульсное нагружение элементов конструкций, деформация которых происходит в упругой области. Представленные задачи теории упругости (прямые, обратные и задачи управления) сведены к анализу систем интегральных уравнений во времени. Изучены нестационарные воздействия на струны, мембраны, стержни, пластины, цилиндрические и сферические оболочки, упругие тела, ограниченные цилиндрическими поверхностями и плоскостями.

Для научных работников, инженеров, преподавателей вузов, аспирантов и студентов, специализирующихся в областях механики деформируемого твердого тела и динамики и прочности машин.

Ил. 169. Табл. 4. Библиогр.: 72 назв.

Досліджено імпульсне навантаження елементів конструкцій, деформація яких відбувається в пружній області. Представлені задачі теорії пружності (прямі, обернені та задачі управління) приведені до аналізу систем інтегральних рівнянь за часом. Вивчені нестационарні дії на струни, мембрани, стержні, пластины, циліндричні та сферичні оболонки, пружні тіла, що обмежені циліндричними поверхнями та площинами.

Для наукових працівників, інженерів, викладачів вузів, аспірантів та студентів, які спеціалізуються в галузях механіки деформівного твердого тіла та динаміки та міцності машин.

Іл. 169. Табл. 4. Бібліогр.: 72 назв.

Рецензенты: *А.Е. Божко*, чл.-корр. НАН Украины, д-р техн. наук,
проф., ИПМаш НАНУ
А.С. Куценко, д-р техн. наук, проф., НТУ “ХПИ”

ISBN 966-303-060-7

© Е. Г. Янютин и др. 2010.
© ХНАДУ 2010.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. НЕСТАЦИОНАРНОЕ НАГРУЖЕНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН	
1.1. Воздействию на прямоугольную пластину произвольных нагрузений	7
1.2. Идентификация поперечных нагрузок на основе экспериментальных данных	24
1.3. Нестационарные колебания пластины с присоединенной сосредоточенной массой	36
1.4. Импульсное деформирование прямоугольных пластин на упругом основании	45
1.5. Идентификация нескольких импульсных нагрузок, воздействующих на пластину	55
ГЛАВА 2. УПРАВЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ПЛАСТИНЫ С ПОМОЩЬЮ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК	
2.1. Управление колебаниями в точке пластины	66
2.2. Управление поперечными колебаниями на небольшой области пластины	78
2.3. Активное гашение нестационарных колебаний прямоугольной пластины	85
ГЛАВА 3. ОБРАТНЫЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК	
3.1. Обратные нестационарные задачи для составного стержня	91
3.2. Обратные нестационарные задачи для цилиндрической оболочки	105

ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

4.1. Идентификация осевой нестационарной силы, воздействующей на стержень переменного сечения	150
4.2. Идентификация нестационарной нормальной нагрузки, воздействующей на цилиндрическую оболочку	163
4.3. Идентификация нестационарной силы, воздействующей на коническую оболочку	175

ГЛАВА 5. ЗАДАЧА О НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ КИНЕМАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

5.1. Решение прямой задачи	181
5.2. Описание численного эксперимента в прямой задаче	190
5.3. Решение обратной задачи по восстановлению граничных перемещений	193
5.4. Пример численного расчета граничных перемещений на начальном этапе деформирования полупространства	199

ГЛАВА 6. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ АСИММЕТРИЧНОГО БИМОРФА

6.1. Общие сведения из теории электроупругости	202
6.2. Уравнения движения биморфа	207
6.3. Колебания биморфа в режиме прямого пьезоэффекта	211
6.4. Восстановление временной составляющей механической нагрузки	215
6.5. Обратная граничная задача нестационарной теории электроупругости	218
6.6. Управление деформированным состоянием биморфа	222
6.7. Численные результаты	226
ЛИТЕРАТУРА	232

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых конструкций, работающих при динамических нагрузках (стационарных и нестационарных), способствует повышению актуальности проблем механики деформируемых тел.

К наиболее сложным и важным с точки зрения практических приложений относятся задачи, в которых исследуются вопросы об импульсном нагружении элементов конструкций. Множество задач этого направления можно разделить на две группы.

Первая группа предусматривает разработку способов решения задач, когда являются известными воздействующие на элементы конструкции нагрузки. Число задач этой группы к настоящему времени исчисляется тысячами. И эти задачи содержат многочисленные подходы к их решению и трактовку полученных результатов.

Вторая группа задач предполагает неизвестными воздействующие на элементы конструкции нагрузки, которые могут быть основными в их поиске при построении соответствующих решений. Задач этой группы, описанных в литературе, значительно меньше.

Настоящая монография посвящена изложению решений так называемых обратных задач нестационарной механики деформируемого твердого тела. В монографии продолжается развитие вопросов, которые были освещены в работах [59, 60].

Исследования, которые предлагаются вниманию читателей в настоящей монографии, основаны на теории некорректных задач математической физики применительно к решению проблем механики деформируемого твердого тела.

Число соавторов этой монографии по сравнению с указанными ранее возросло, также значительно расширился круг задач, которые в ней описаны. Исходя из специфики изложения материала можно назвать настоящую монографию сборником исследований специалистов, работающих в одной конкретной области.

Исследования, которые отражены в монографии, включают в себя следующее:

1. Решение прямых задач импульсного нагружения деформируемых объектов.
2. Решение обратных задач по идентификации (распознаванию)

внешних нестационарных воздействий на основе косвенных их проявлений.

3. Описание решений управления деформационными параметрами с помощью вводимых дополнительных сил.

В основу исследований, в целом, положены подходы, сводящие задачи к решению систем интегральных уравнений типа Вольтерра во времени.

Монография состоит из **x** глав.

Работа может представлять интерес для специалистов, работающих в области механики деформируемого твердого тела, а также в смежных областях. Полезна монография для студентов старших курсов механико-математического, инженерно-физического, физико-технического факультетов университетов, а также для студентов всех технических специальностей, изложение которым проблем прочности в процессе обучения производится с использованием современных методов математического и функционального анализов и математической физики.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Алавердиев А.М., Ахметов Н.Б., Шермергор Т.Д. Исследование напряженно-деформированного состояния слойно-ступенчатых дисковых преобразователей при изгибных колебаниях // Пробл. прочности. – 1987. – № 2. – С. 59 – 63.
2. Апарцин А.С. Неклассические интегральные уравнения Вольтерра первого рода. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 193 с.
3. Апарцин А.С. О применении различных квадратурных формул для приближенного решения интегральных уравнений Вольтерра 1-го рода методом квадратурных сумм // Дифф. и интегр. уравнения. – 1973. – Вып. 2. – С. 107 – 110.
4. Апарцин А.С., Бакушинский А.Ю. Приближенное решение интегральных уравнений Вольтера 1-го рода методом квадратурных сумм // Дифф. и интегр. уравнения. – 1972. – Вып. 1. – С. 248 – 258.
5. Ахтьямов А.М. Определение формы закрепления круговой пластинки по собственным частотам. // Тез. докл. 8 Четаевской междунар. конф. "Аналитическая механика, устойчивость и управление движением", Казань, 28-31 мая 2002. – С. 302.
6. Бабаев А.Э. Нестационарные волны в сплошных средах с системой отражающих поверхностей. – К.: Наук. думка, 1990. – 176 с.
7. Бабаев А.Э., Мосеенков Ю.Б. Нестационарные колебания тонкостенной электроупругой полосы // ДАН. Серия Математика, естествознание, технические науки. – 1994. – № 12. – С. 54 – 58.
8. Балакирев М.К., Гилинский И.А. Волны в пьезокристаллах. – Новосибирск: ****, 1982. – 239 с.
9. Балкевич В.Л. Техническая керамика: Учебн. пособие для втузов. – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
10. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 598 с.
11. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. литры, 1981. – 718 с.

12. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. – К.: Наук. думка, 1986. – 543 с.
13. Власов В.З., Леонтьев Н.Н. Балки, плиты и оболочки на упругом основании. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1960. – 492 с.
14. Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В., Севрюков В.И., Янютин Е.Г. Скоростное деформирование элементов конструкций. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
15. Воропай А.В., Янютин Е.Г. Идентификация нескольких импульсных нагрузок, воздействующих на пластину // Прикл. мех. – 2007. – **43**, № 7. – С. 90-97.
16. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1967. – 576 с.
17. Голоскоков Е.Г., Филиппов А.П. Нестационарные колебания механических систем. – К.: Наук. думка. -1977. – 340 с.
18. Гончарский А.В., Черепашук А.М., Ягола А.Г. Численные методы решения обратных задач астрофизики. – М.: Наука, 1978. – 336 с.
19. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности: Учеб. для вузов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 416 с.
20. Григолюк Э.И., Селезов И.Т. Механика твердых деформируемых тел. Т. 5. Неклассические теории колебаний стержней, пластин и оболочек. – М.: ВИНТИ, 1973. -272 с.
21. Григорьева Л.О. Колебания пьезокерамического цилиндра при нестационарном электрическом возбуждении // Прикл. мех. – 2007. – **43**, № 3. – С. 73 – 79.
22. Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т.5. Электроупругость. – К.: Наук. думка, 1989. – 280 с.
23. Гузь А.Н., Кубенко В.Д. Методы расчета оболочек. Т. 5. Теория нестационарной аэрогидроупругости оболочек. – К.: Наук. думка, 1982. – 400 с.
24. Гузь А.Н., Кубенко В.Д., Бабаев А.Э. Динамика систем оболочек, взаимодействующих с жидкостью // Прикл. мех. – 2002. – **38**, № 3. – С. 13 – 58.

25. Данилов В.Л., Иванова А.Н. и др. Математический анализ (функции, пределы, ряды, цепные дроби). – М: ФИЗМАТГИЗ, 1961. – 439 с.
26. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. Пер. с англ. – М: Мир, 1989. – 510 с.
27. Диткин В.А., Прудников А.П. Операционное исчисление. – М.: Высшая школа, 1966. – 405 с.
28. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. – М.: Высшая школа, 1965. – 466 с.
29. Евсейчик Ю.Б., Рудницкий С.И., Шарапов В.Л., Шульга Н.А. Чувствительность биморфного преобразователя типа металл-керамика // Прикл. мех. – 1990. – **26**, № 12. – С. 67 – 75.
30. Жарий О.Ю., Улитко А.Ф. Введение в механику нестационарных колебаний и волн. – К.: Вища школа, 1989. – 184 с.
31. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-83. МИНТРАНССТРОЙ. – М.: Транспорт, 1985. – 157 с.
32. Колодяжный А.В., Севрюков В.И., Ударные и импульсные воздействия на конструкции и материалы. – К.: Наук. думка, 1986. – 168 с.
33. Кохманюк С.С., Янютин Е.Г., Романенко Л.Г. Колебания деформируемых систем при импульсных и подвижных нагрузках. – К.: Наук. думка, 1980. – 232 с.
34. Краснов М.Л., Киселев А.И., Макаренко Г.И. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости. – М.: ***, 1971. – 256 с.
35. Лурье А.И. Операционное исчисление. – М.: Гостехтеориздат, 1950. – 432 с.
36. Охлопков Н.М. Методологические вопросы теории и практики разностных схем. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1989. – 256 с.
37. Поручиков В.Б. Методы динамической теории упругости. – М.: Наука, 1986. – 328 с.
38. Пьезокерамические преобразователи / Под ред. С.И. Пугачева. – Л.: Судостроение, 1984. – 256 с.
39. Радовский Б.С. Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд. – К.: ООО «Полиграфконсалтинг», 2003. – 240 с.

40. Рихтмаер Р.Д. Разностные методы решения краевых задач. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960. – 262 с.
41. Рудницкий С.И., Шарапов В.М., Шульга Н.А. Колебания дискового биморфного преобразователя типа металл-пьезокерамика // Прикл. мех. – 1990. – **26**, № 10. – С. 64 – 72.
42. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1989. – 616 с.
43. Сметанкина Н.В., Угримов С.В., Шупиков А.Н., Бузько Я.П. Динамический отклик пластин, лежащих на упругом основании // Вестник НТУ "ХПИ". Технологии в машиностроении. – 2002. – № 19. – С. 68 – 72.
44. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1967. – 444 с.
45. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. – М.: Наука, 1983. – 200 с.
46. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1990. – 229 с.
47. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1986. – 288 с.
48. Улитко А.Ф. К теории колебания пьезокерамических тел // Тепловые напряжения в элементах конструкций. – 1975. – Вып. 15. – С. 90 – 99.
49. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. – М.: Техносфера, 2006. – 224 с.
50. Уфлянд Я. С. Распространение волн при поперечных колебаниях стержней и пластин // Прикладная математика и механика. – 1948. – **12**, № 3. – С. 287 – 300.
51. Филиппов А.П., Кохманюк С.С., Янютин Е.Г. Деформирование элементов конструкций под действием ударных и импульсных нагрузок. – К.: Наук. думка, 19**.*. – 184 с.
52. Филиппов А.П., Янютин Е.Г., Определение начальной реакции конической оболочки на импульсную нагрузку // Прикл. мех. – 1971. – **7**, № 8. – С. 111 – 114.
53. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 734 с.

54. Фридман Л.И. Динамическая задача теории упругости для тел канонической формы // Прикл. мех. – 1987. – **23**, №12. – С. 102 – 108.
55. Шарапов В.М., Минаев И.Г., Бондаренко Ю.Ю. и др. Пьезоэлектрические преобразователи. – Черкассы: Изд-во ЧГТУ, 2004. – 436 с.
56. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
57. Шульга Н.А., Болкисев А.М. Колебания пьезоэлектрических тел. – К.: Наук. думка, 1990. – 228 с.
58. Янютин Е. Г., Воропай А. В., Ярещенко В. Г. Идентификация ударного нагружения пластины на основе экспериментальных данных // Вестник НТУ "ХПИ". Динамика и прочность машин. – 2004. – № 31 – С. 176 – 179.
59. Янютин Е.Г., Янчевский И.В. Импульсные воздействия на упруго деформируемые элементы конструкций. – Харьков: Изд-во ХГАДТУ, 2001. – 184 с.
60. Янютин Е.Г., Янчевский И.В., Воропай А.В., Шарапата А.С. Задачи импульсного деформирования элементов конструкций. - Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2004. – 392 с.
61. Chen Lin-Hung, Huang Shyh-Chin. Vibration attenuation of a cylindrical shell with constrained layer damping strips treatment // Comput. and Struct. – 2001. – **79**, N 14. – P. 1355 – 1362.
62. Chen W.Q., Cai J.B., Ye G.R., Wang Y.F. Exact three-dimensional solutions of laminated orthotropic piezoelectric rectangular plates featuring interlaminar bonding imperfections modeled by a general spring layer // Int. J. Solids and Struct. – 2004. – **41**, N 12. – P. 5247 – 5263.
63. Ding H.J., Wang H.M., Hou P.F. The transient responses of Piezoelectric Hollow Cylinders for Axymetrical Plane Stress Problems // Int. J. Solids and Struct. – 2003. – **40**, N **. – P. 105 – 123.
64. Hagenmuller P. Selection of intelligent materials used in practical applications // Chemtronics. – 1989. – **4**, N 4. – P. 254 – 258.
65. He X.Q., Ng T.Y., Sivashanker S., Liew K.M. Active control of FGM plates with integrated piezoelectric sensors and actuators // Int. J. Solids and Struct. – 2001. – **38**, N 9. – P. 1641 – 1655.

66. Kapuria S., Dumir P.C. Coupled FSDT for piezothermoelectric hybrid rectangular plate. // *Int. J. Solids and Struct.* – 2000. – **37**, N 42. – P. 6131 – 7153.
67. Khoroshun L.P. General Dynamic Equations of Electromagnetomechanics for Dielectrics and Piezoelectrics // *Appl. Mech.* – 2006. – **42**, N 4. – P. 407 – 420.
68. Lamm P.K., Scofield T.I. Sequential predictor-corrector methods for the variable regularization of Volterra inverse problems // *Inverse problems.* – 2000. – 16. – P. 373 – 399.
69. Naghdi P.M., Cooper R.M. Propagation of elastic waves in cylindrical shells including the effect of transverse shear and rotary inertia // *J. Acoustic Soc. Amer.* – 1956. – **28**, N 1. – P. 56 – 63.
70. Saadat S., Noori M. et al. Using NiTi SMA tendons for vibration control of coastal structures // *Smart Mater. and Struct.* – 2001. – **10**, N 4. – P. 695 – 704.
71. Tani J., Takagi T., Qiu J. Intelligent material systems: application of functional materials // *Appl. Mech. Rev.* – 1998. – 51. – P. 505 – 521.
72. The Encyclopedia of Smart Materials / M. Schwartz, editor-in-chief. – NY: A Wiley-Intersc. Publ., 2002. – 1193 p.